

U形7A09铝型材拉弯成形截面畸变控制

王妍琴¹, 王东¹, 李继光¹, 刘聪², 梁立冬¹, 王悦¹, 马凯¹, 王振¹

(1. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462; 2. 北京航空航天大学 机械设计及自动化学院, 北京 100191)

摘要: 中空型材在拉弯过程中容易出现截面畸变的问题。针对某运载火箭U形铝型材进行拉弯成形数值模拟与拉弯成形试验, 对比分析两种不同填料及填料与型材间隙对零件截面畸变的影响。模拟结果显示: 在成形参数相同的情况下, 采用聚氯乙烯填料能较好地抑制外侧立边倾斜与凹陷等缺陷; 填料与型材间隙越大, 外侧立边倾斜的角度间隙越大, 但外侧立边的凹陷深度受填料与型材间隙的影响较小。根据模拟结果, 采用聚氯乙烯填料, 在填料与型材间隙 ≤ 0.5 mm的条件下进行拉弯成形试验, 测量成形后零件外侧立边倾斜的角度间隙 < 0.5 mm, 凹陷深度 < 0.3 mm, 满足设计要求。

关键词: 截面畸变; 填料; U形铝型材; 拉弯成形; 聚氯乙烯

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.017

中图分类号: TH162 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 01-0119-06

Control on section distortion for U-shaped 7A09 aluminum profiles in stretch-bending

Wang Yanqin¹, Wang Dong¹, Li Jiguang¹, Liu Cong², Liang Lidong¹, Wang Yue¹, Ma Kai¹, Wang Zhen¹

(1. Tianjin Aerospace Long March Rocket Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The problem of section distortion is prone to occur during the stretch-bending process of hollow profiles. Therefore, for a U-shaped aluminum profile of a launch vehicle, the influences of two different fillers and the gap between filler and profile on the section distortion of part were compared and analyzed by combining the numerical simulation of stretch-bending and the test of stretch-bending. The simulation analysis results show that when the process parameters are the same, the use of PVC filler can suppress the defects well such as the inclination and depression of outer vertical edge, and the larger the gap between filler and profile is, the greater the inclination angle gap of outer vertical edge is, but the depression depth of outer vertical edge is less affected by the gap between filler and profile. Based on the simulation results, the stretch-bending test was carried out under the condition that the gap between filler and profile was ≤ 0.5 mm with PVC filler, and the measured inclination angle gap of outer vertical edge for the part after forming was less than 0.5 mm and the measured depression depth was less than 0.3 mm, which met the design requirements.

Key words: section distortion; filler; U-shaped aluminum profiles; stretch-bending; PVC

随着我国新型运载火箭研制水平的高速发展, 为了保证结构的整体强度并满足轻量化的要求, 部分结构件采用中空型材进行拉弯成形。拉弯成形是在毛料弯曲的同时加以轴向拉力, 改变毛料剖面内的应力分布情况, 使之趋于均匀, 以减少回弹和提高剖面尺寸精度, 因此, 拉弯成形的零件回弹小、产品尺寸精度高、工艺可靠性高。但是, 中空型材在拉弯过程中容易出现截面畸变的问题, 因此, 需要对内腔进行填充后再拉弯成形。目前, 很多学者对中空截面型材的拉弯成形进行了研究, 得克萨斯

州大学的 Miller J 等^[1] 研究发现, 向中空腔内注入足够的高压空气可以有效地减少型材的空腔塌陷问题和截面畸变程度; 周贤宾等^[2-4] 对中空和复杂截面的铝合金拉弯成形进行了有限元模拟和试验, 得出在中空型材拉弯时通过在侧壁加约束、内部加支撑块等可以控制截面畸变的结论; 王汝彪等^[5] 研究了轨道列车中空铝合金型材拉弯成形工艺, 在型腔中填充压强可以提升中空型材的拉弯成形效果; 滕菲^[6] 研究发现, 在矩形型材内部添加钢块可以抑制截面凹陷。但是, 目前关于中空型材内腔填料的材料种类仍缺乏研究资料。

本文对某运载火箭上直径为 $\Phi 5$ m 的 U 形边框拉弯成形工艺进行研究, 通过数值模拟及拉弯成形试验, 对比分析两种不同的填料及填料与型材间隙

收稿日期: 2021-01-12; 修订日期: 2021-04-15

作者简介: 王妍琴 (1987-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: 1124337718@qq.com

对零件截面畸变的影响,掌握了该 U 形边框拉弯成形过程中截面畸变的控制方法,试验结果为中空零件的拉弯成形提供了经验。

1 研究对象及方法

1.1 研究对象

该边框截面形状如图 1 所示,与模具的装配关系如图 2 所示。边框原材料为 O 态 7A09 铝合金挤压型材。零件为半圆形,半径为 2483.5 mm,要求立边倾斜的角度间隙小于 1.0 mm,同时表面不允许有大于 0.5 mm 的波纹度。

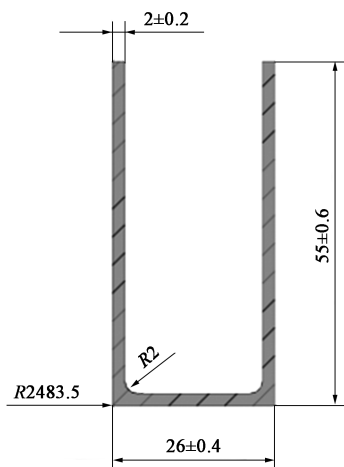


图 1 零件截面图

Fig. 1 Section view of part

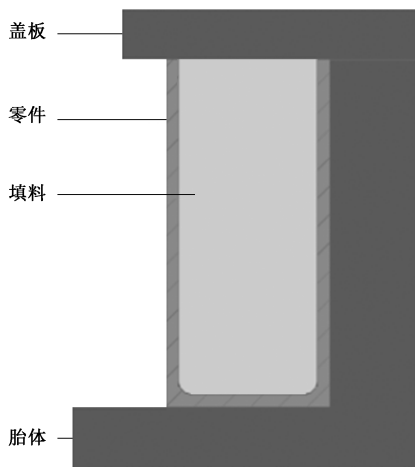


图 2 零件与模具装配关系

Fig. 2 Assembly relationship of part and mould

1.2 研究方法

近 10 多年间,国内外学者分别采用解析计算法、试验分析法和有限元数值模拟对型材拉弯成形工艺进行了研究^[7-10]。根据之前某类中空零件的生

产经验,采用聚氨酯填料对内腔进行填充,零件成形后外侧立边(不靠模一侧)会出现角度倾斜及型面凹陷的现象,如图 3 所示。在图 3 中, θ 为外侧立边倾斜的角度间隙, d 为外侧立边的凹陷深度。缺陷的出现初步考虑为填料支撑强度不够而导致的;当采用聚氯乙烯填料时,型面精度明显改善。但是因为零件材料与结构不同,本文采用有限元模拟与试验相结合的方法研究边框的拉弯成形工艺。通过铝合金单向拉伸试验获取材料力学性能参数,通过查阅文献^[11-12]获取两种填料,即聚氯乙烯和聚氨酯的材料参数,重点从两种填料和填料与型材间隙两个方面分析成形后的缺陷。从而可以选取合适的填料和填料与型材间隙来进行拉弯成形工艺试验。

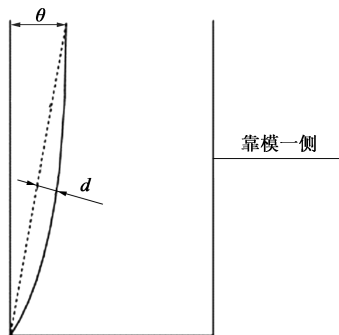


图 3 截面缺陷示意图

Fig. 3 Schematic diagram of section defect

2 拉弯成形有限元分析

2.1 材料参数

本次研究涉及到的材料有 O 态 7A09 铝合金、聚氯乙烯和聚氨酯。对铝合金进行单拉试验以获取其材料参数,不考虑铝合金材料和聚氯乙烯材料的各向异性屈服行为,使用幂指式方程来描述铝合金材料应变强化行为,对于聚氨酯材料,选用双参数 Mooney-Rivlin 模型来描述聚氨酯超弹性力学行为。

(1) O 态 7A09 铝合金

铝合金单向拉伸试验后,对试验数据进行处理,得到 O 态 7A09 铝合金的工程应力-工程应变曲线及相应的材料性能数据,如图 4 和表 1 所示。

(2) 聚氯乙烯

根据张淑佳等^[11]对聚氯乙烯本构模型的研究,可得到如图 5 所示的塑性段应力-应变曲线及表 2 所示的材料性能参数。

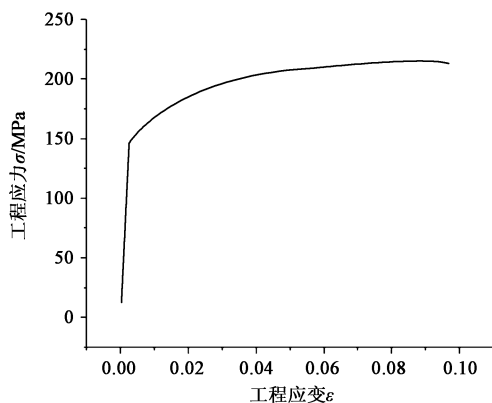


图4 O态 7A09 铝合金单向拉伸的工程应力-工程应变曲线

Fig. 4 Engineering stress-engineering strain curve of annealed 7A09 aluminum profile in uniaxial tension

表1 O态 7A09 铝合金的材料性能参数

Table 1 Material property parameters of annealed 7A09 aluminum alloy

参数	厚度/ mm	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	总伸长率/ %
数值	2.0	67.751	153.935	224	11

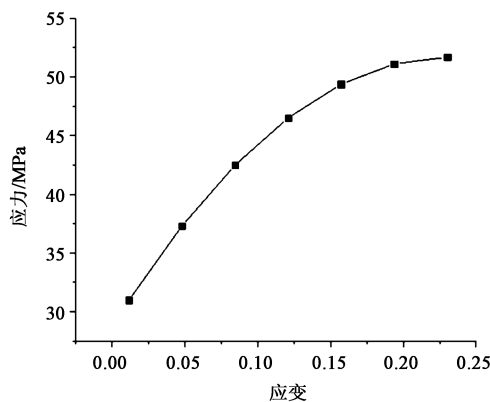


图5 聚氯乙烯塑性段应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve in plastic stage of PVC

表2 聚氯乙烯的材料性能参数

Table 2 Material property parameters of PVC

参数	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	总伸长率/ %	泊松比
数值	3.5	31	30	0.38

(3) 聚氨酯

橡胶材料的超弹性力学行为可以用应变能函数 W 描述, 应变能函数 W 建立在各向同性和体积不可压缩性的假设基础上, 本次模拟选用最常用的双参数 Mooney-Rivlin 模型来描述, 它的数学表达形式如式 (1) 所示:

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) \quad (1)$$

式中: C_{10} 和 C_{01} 分别为截距和斜率; \bar{I}_1 和 \bar{I}_2 分别为应变不变量 I_1 、 I_2 的均值。

根据万政^[12]对聚氨酯材料的研究, 得到了橙色聚氨酯的双参数 Mooney-Rivlin 模型的常数, 见表 3。

表3 橙色聚氨酯橡胶的双参数 Mooney-Rivlin 模型常数

Table 3 Constant values of two-parameter Mooney-Rivlin model for orange polyurethane rubbers

参数	截距 C_{10} /MPa	斜率 C_{01} /MPa
数值	0.736	0.184

2.2 有限元模型建立

利用 Abaqus 软件进行拉弯成形有限元建模及仿真。由于零件的对称性, 只建立 1/2 模型。模型由 4 个部分组成: 铝型材、填料、夹钳和成形模具。型材单元类型设为壳单元、5 个厚向积分点 (高斯积分点); 填料单元类型设为体单元 (缺省)。采用位移控制方法, 摩擦因数设为 0.3, 接触采用 General Contact, 求解采用 Dynamic Explicit 动力显式计算。

本次仿真主要研究截面畸变与不同填料以及填料与型材间隙 Δh 之间的关系如图 6 所示, 其中 R 为零件的弯曲半径, 依据这两个变量建立了 8 个仿真模型, 如表 4 所示。

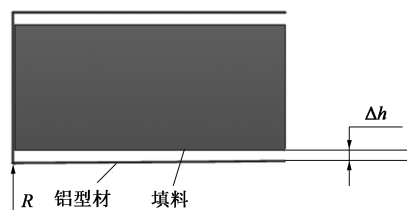
图6 填料与型材间隙 Δh 示意图Fig. 6 Schematic diagram of gap Δh between filler and profiles

表4 不同填料下有限元模型参数

Table 4 Finite element model parameters of different fillers

填料种类	聚氯乙烯				聚氨酯			
模型编号	1	2	3	4	5	6	7	8
填料与型材 间隙/mm	0.00	0.25	0.50	1.00	0.00	0.25	0.50	1.00

2.3 仿真结果

表 4 中列出的 8 个模型的应力仿真结果如图 7 所示, 通过仿真结果可以看出, 随着填料与型材间隙的不同, 有些模型出现明显的截面畸变。

为了更加清楚地表示截面畸变, 沿型材周向等角度 (30°) 取 4 个截面 (90° 范围内)。用 4 个截

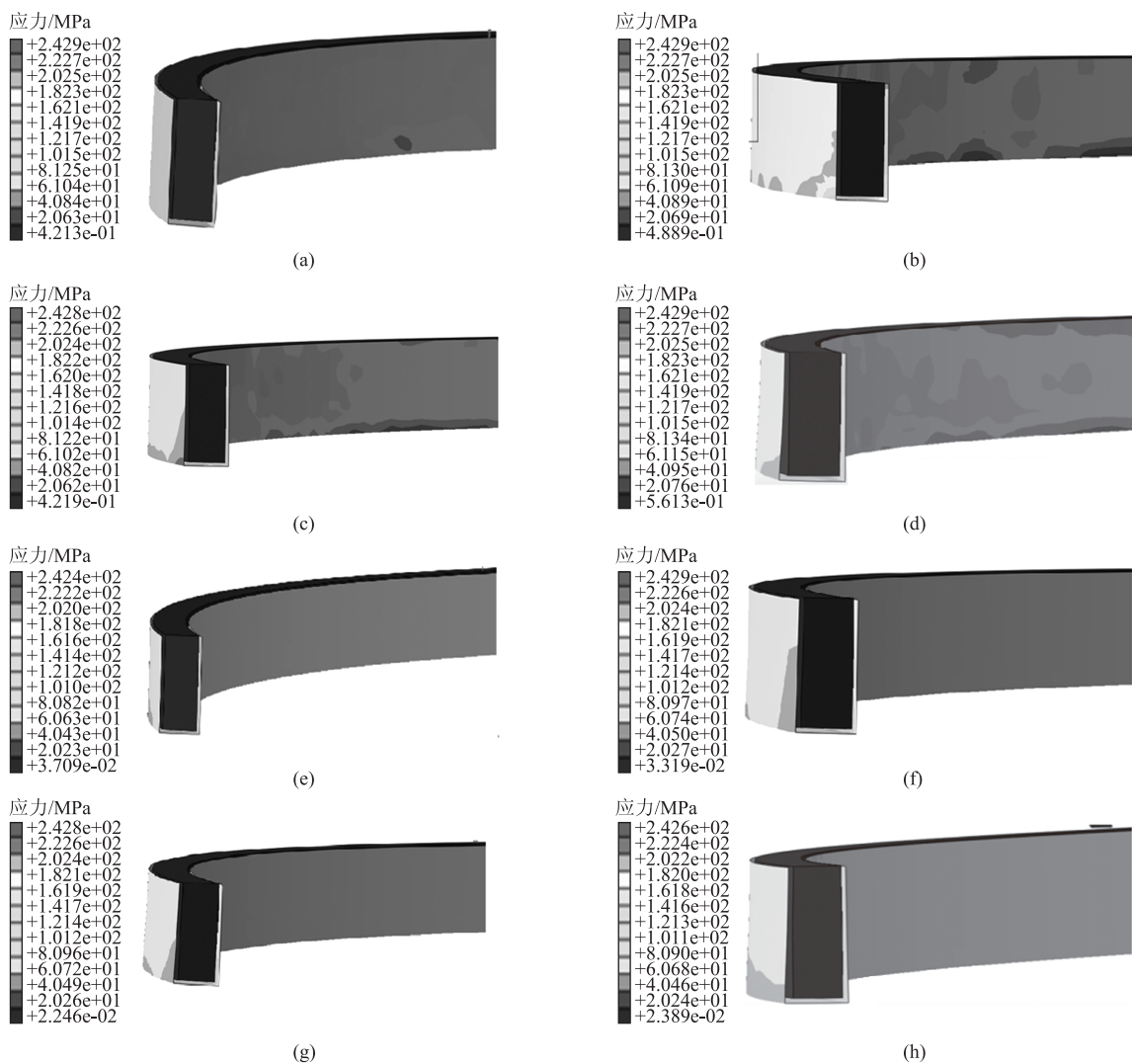


图 7 各模型的应力仿真结果

(a) 模型 1 (b) 模型 2 (c) 模型 3 (d) 模型 4 (e) 模型 5 (f) 模型 6 (g) 模型 7 (h) 模型 8

Fig. 7 Simulation results of stress for each model

(a) Model 1 (b) Model 2 (c) Model 3 (d) Model 4 (e) Model 5 (f) Model 6 (g) Model 7 (h) Model 8

面的外侧立边倾斜角度间隙的平均值 θ 与外侧立边凹陷深度平均值 d 来表征截面缺陷。8 组模型的成形缺陷测量值如图 8 所示。

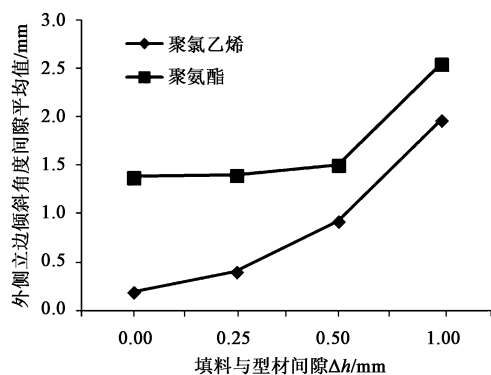
由图 8a 可以看出：填料与型材间隙越大，外侧立边的倾斜角度间隙越大；使用聚氨酯填料时，外侧立边倾斜角度间隙的平均值 >1.0 mm，而使用聚氯乙烯填料时，在填料与型材间隙 ≤ 0.5 mm 时，外侧立边倾斜角度间隙的平均值小于 1.0 mm，满足设计要求。由图 8b 可以看出：外侧立边凹陷深度受填料与型材间隙的影响较小；使用聚氨酯填料时，外侧立边凹陷深度 >0.5 mm，而使用聚氯乙烯填料时，外侧立边凹陷深度平均值小于 0.5 mm，满足设计要求。

综上，使用聚氯乙烯填料，在填料与型材间隙 ≤ 0.5 mm 的条件下进行拉弯成形，U 形边框精度可以满足设计要求。

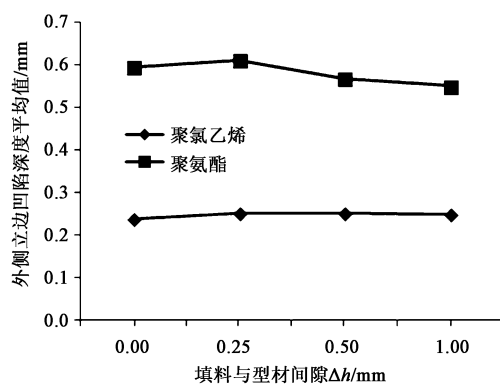
3 拉弯成形试验

根据有限元分析结果，采用聚氯乙烯填料，在填料与型材间隙 ≤ 0.5 mm 的条件下进行拉弯成形试验。图 9 为边框拉弯试验件（ 180° 零件），沿零件周向等角度（ 45° ）取 5 个截面，测量外侧立边倾斜的角度间隙与凹陷间隙。表 5 为试验件的测量数据。

由测量结果可以看出，外侧立边的倾斜角度间



(a)



(b)

图8 各模型的成形缺陷仿真结果

(a) 外侧立边倾斜角度间隙平均值

(b) 外侧立边凹陷深度平均值

Fig. 8 Simulation results of forming defect for each model

(a) Mean values of gap for inclination angle of outer vertical edge

(b) Mean values of depression depth of outer vertical edge



图9 试验件

Fig. 9 Test piece

隙均小于 0.5 mm, 外侧立边的凹陷深度均小于 0.3 mm, 该两项参数满足设计要求, 试验数据与模拟数据也基本一致。

表5 试验件的测量结果 (mm)

Table 5 Measuring results of test pieces (mm)

序号	外侧立边倾斜角度间隙	外侧立边凹陷深度
1	0.2	0.1
2	0.3	0.1
3	0.4	0.2
4	0.3	0.1
5	0.2	0.1

4 结论

(1) 增加填料可以使中空型材零件顺利拉弯成形, 填料的变形抗力能较好地抑制截面畸变。

(2) 根据模拟和成形效果可知, 在 U 形边框的拉弯成形过程中, 聚氯乙稀填料有较高的变形抗力, 能更好地抑制外侧立边倾斜与凹陷等成形缺陷。

(3) 填料与型材之间的间隙越大, 外侧立边的倾斜角度间隙越大; 但外侧立边的凹陷深度受填料与型材间隙的影响较小。

参考文献:

- [1] Miller J, Kyriakides S, Bastard A. On bend-stretch forming of aluminum extruded experiments [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43 (5): 1283-1317.
- [2] 刁可山, 周贤宾, 李晓星, 等. 矩形截面型材拉弯成形 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31 (2): 134-137.
Diao K S, Zhou X B, Li X X, et al. Stretch bending of aluminum extrusion [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31 (2): 134-137.
- [3] 李小强, 周贤宾, 金朝海, 等. 型材拉弯数值模拟夹钳边界条件的一种等效模型 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (1): 64-69.
Li X Q, Zhou X B, Jin C H, et al. An equivalent model of jaws boundary condition in numerical simulation of stretch bending for extrusions [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16 (1): 64-69.
- [4] 刁可山, 周贤宾, 金朝海. 铝合金型材拉弯成形研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2003, 10 (6): 231-234.
Diao K S, Zhou X B, Jin C H, et al. Study on stretch-bending process for aluminium extrusions [J]. Journal of Plastic Engineering, 2003, 10 (6): 231-234.
- [5] 王汝彪, 刘纯国. 高强度中空铝型材成形工艺研 [J]. 锻压装备与制造技术, 2013, 3 (2): 93-96.

(下转第 152 页)